

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ КОМБІНОВАНОЇ СХЕМИ ОДНОФАЗНОГО ВКЛЮЧЕННЯ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ НАСОСНИХ УСТАНОВОК

Ю.В. Шуруб<sup>1\*</sup>, канд.техн.наук, В.С. Василенков<sup>2</sup>, канд.техн.наук, Ю.Л. Цицюрський<sup>2</sup>

<sup>1</sup> – Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна.

E-mail: [shurub@bigmir.net](mailto:shurub@bigmir.net),

<sup>2</sup> – Національний університет біоресурсів і природокористування України,  
вул. Героїв Оборони, 15, Київ, 03041, Україна.

Для насосних установок запропоновано комбіновану схему однофазного включення регульованого за напругою асинхронного електроприводу з трифазним двигуном, що дає змогу отримати задовільні експлуатаційні та енергетичні характеристики у пусковому та робочому режимах при постійній ємності фазозміщуючого конденсатора. Доведено можливість зменшення втрат потужності внаслідок застосування перемикачів схем включення обмоток двигуна на різних діапазонах регулювання швидкості порівняно із схемами з постійною структурою. Бібл. 9, рис. 5.

**Ключові слова:** асинхронний електропривод, фазозміщуючий конденсатор, однофазне живлення.

**Вступ.** Однофазне живлення асинхронних електроприводів (ЕП) насосних установок доцільно застосовувати у разі ускладнених умов електропостачання, наприклад, у побуті та комунальному господарстві [1], у системах регулювання мікроклімату віддалених сільськогосподарських споживачів [2,3], у системах водопостачання та трубопровідного транспорту, де електроживлення насоса може відбуватися через кабель-канат і трубопровід. Використання регульованого електроприводу таких споживачів дає змогу забезпечити технологічні вимоги та збільшити енергоефективність насосного агрегату [4]. Застосування у таких електроприводах відомих схем включення трифазного двигуна з фазозміщуючим конденсатором із постійною ємністю, що мають постійну структуру силової частини, може значно погіршувати експлуатаційні та енергетичні характеристики електроприводу у пускових режимах та під час роботи з номінальною швидкістю [5]. Використання пускового конденсатора або конденсатора з регульованою ємністю збільшує масогабаритні показники ЕП. Тому у даній роботі пропонується застосування комбінованої схеми ЕП із змінною структурою силової частини та постійною ємністю фазозміщуючого конденсатора.

**Метою даної роботи** є обґрунтування доцільності застосування комбінованої схеми асинхронного електроприводу насосних установок при однофазному живленні.

**Матеріали досліджень.** Експлуатаційні властивості насоса можна представити у вигляді залежності напору  $H$  від витрат  $Q$ .  $Q$ - $H$ -характеристики насоса у разі різних швидкостей обертання показані на рис. 1. Гідрравлічна мережа, на яку працює насос, характеризується наявністю протитиску внаслідок геодезичної різниці рівнів насоса і споживача, що зумовлює появу статичної складової напору.  $Q$ - $H$ -характеристики гідрравлічної мережі за наявності статичного напору, що дорівнює 60% від номінального, і без нього також показані на рис. 1. Видно, що для регулювання витрат, наприклад, у діапазоні 0,3–1,0  $Q_n$  для мережі без протитиску потрібен діапазон регулювання швидкості (0,25–1,0)  $\omega_n$ , тоді як за наявності протитиску – тільки (0,7–1,0)  $\omega_n$ . У такому діапазоні, враховуючи випадковий характер зміни витрат у мережі, є доцільним з точки зору оптимізації енергоспоживання застосування регульованого за напругою асинхронного електроприводу [6,7].

Розглянемо електропривод насосу з двигуном 4А71В2 потужністю 1,1 кВт при однофазному живленні.

При виборі варіанта ЕП насосної установки повинні забезпечуватися мінімум масогабаритних показників, надійність пуску за наявності постійної складової моменту навантаження. Тому була обрана схема комбінованого включення (рис. 2). Обмотки двигуна у пусковому режимі вмикаються за схемою послідовно-паралельного включення (положення 2 контактора  $K$ ), у робочому

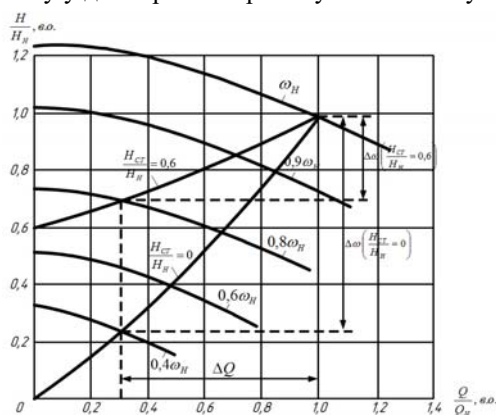


Рис. 1

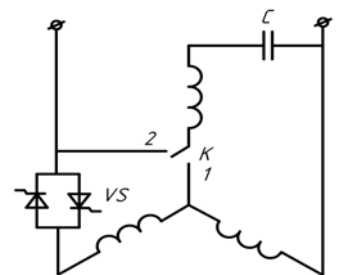


Рис. 2

режимі – за схемою Штейнметца (положення 1 контактора  $K$ ). Величину ємності конденсатора вибрано за методикою, викладеною у [1], за умови забезпечення у разі номінального ковзання мінімуму коефіцієнта несиметрії  $\gamma = \min$ , що визначається як відношення напруг зворотної  $U_n$  та прямої  $U_p$  послідовностей  $\gamma = U_n/U_p$ . Тиристорний регулятор VS дає змогу регулювати швидкість двигуна у робочому режимі та величину пускового моменту у пусковому режимі.

Механічні характеристики ЕП за різних кутів відкриття тиристорів  $\alpha$  побудовані за моделлю [8], показаною на рис. 3. Також на рис. 3 показана усереднена механічна характеристика навантаження для насосних агрегатів, що характеризується значною постійною складовою

$$\frac{M}{M_n} = \frac{M_c}{M_n} + \left(1 - \frac{M_c}{M_n}\right) \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2, \quad (1)$$

де  $M_n$ ,  $\omega_n$  – номінальний момент та швидкість двигуна,  $M$ ,  $\omega$  – поточні момент та швидкість двигуна,  $M_c$  – постійна складова моменту, що не залежить від швидкості.

За методикою [1] проведено розрахунки залежностей споживаної потужності даної схеми від моменту навантаження при різних положеннях контактора  $K$  за різних фіксованих значень швидкості, тобто в одних і тих самих точках площини механічної характеристики. Розрахунки показали, що при будь-якому моменті навантаження існує гранична швидкість, за якої споживані потужності схеми з послідовно-паралельним включенням обмоток та схеми Штейнметца однакові, причому перетинання кривих споживаної потужності для різних значень швидкості обертання відбуваються у разі різних значень моменту (наприклад,  $M=2$  Нм при  $\omega=250$  1/с та  $M=3,1$  Нм при  $\omega=270$  1/с).

Якщо точки перетину кривих, що показують залежність споживаної розглянутими схемами потужності від моменту навантаження за різних фіксованих значень швидкості обертання двигуна, перенести на площину механічних характеристик, то можна провести умовну межу, де споживані потужності двигуна при його включенні за схемою Штейнметца та при включенні за послідовно-паралельною схемою однакові. Ця межа показана на рис. 4 (крива 1) і названа лінією рівних втрат схем, що розглядаються. Область, що знаходиться праворуч від лінії рівних втрат, є областю, в якій двигун працює з меншими втратами при включенні його обмоток за послідовно-паралельною схемою. Відповідно ліворуч від лінії рівних втрат менші втрати має схема Штейнметца.

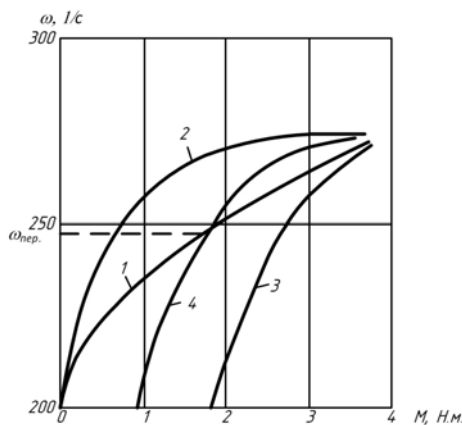


Рис. 4

Лінію рівних втрат можна апроксимувати залежністю  $M = b\omega^2$ , де  $b = \text{const}$ . На рис. 4 показано також варіанти механічних характеристик навантаження (криві 2, 3 і 4). Крива 2 описується рівнянням  $M = c\omega^2$ , де  $c = \text{const}$ . У цьому випадку з енергетичних міркувань краще застосовувати схему Штейнметца за умови  $c < b$ , що виконується при правильному виборі двигуна. Однак, коли момент опору містить також постійну складову (наприклад, тертя) і описується рівнянням  $M = d_1 + c_1\omega^2$  (крива 3), тоді, як видно з рис. 4, доцільно застосовувати послідовно-паралельну схему за умови, що лінія рівних втрат не перетинається з характеристикою навантаження у робочому діапазоні зміни швидкості обертання, тобто при  $d_1/(b - c_1) > \omega_0$ . Якщо ж аналогічна характеристика навантаження, що описується рівнянням  $M = d_2 + c_2\omega^2$  (крива 4), має перетин із лінією рівних втрат при швидкості  $\omega_{\text{неп}} = \sqrt{d_2/b - c_2}$ , то доцільно використовувати комбіноване керування: перемикання схем при швидкості  $\omega_{\text{неп}}$ . При цьому для запобігання частих перемикань між схемами при швидкостях, близьких до швидкості перемикання  $\omega_{i\text{до}}$ , схема керування електроприводом повинна забезпечувати гістерезис [9]. З іншого боку, застосування комбінованого керування дає змогу при глибокому регулюванні швидкості використовувати ємність, обрану з умови мінімальної несиметрії при номінальному ковзанні. Це обумовлено тим, що залежності оптимальної за критерієм мінімуму коефіцієнта несиметрії ємності фазозміщуючого конденсатора від ковзання  $C_{\text{opt}} = f(s)$  для розглянутих схем мають протилежний характер [1]. При збільшенні ковзання в послідовно-паралельній схемі ємність  $C$  повинна зменшуватися, тоді як у схемі Штейнметца збільшення ковзання відповідно до умови отримання мінімальної не-

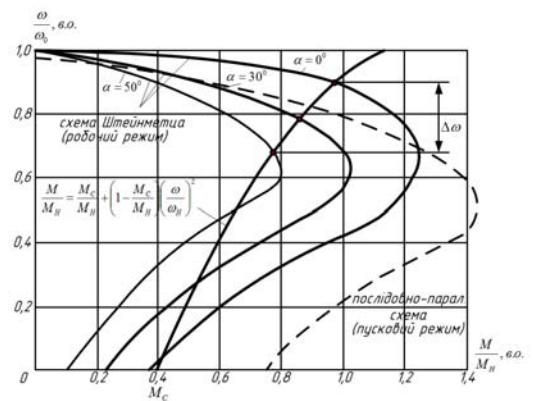


Рис. 3

симетрії має супроводжуватися збільшенням  $C$ . Таким чином, перемикаючи схеми включення, можна отримати при постійній ємності два значення ковзання, за яких обрана ємність забезпечує умову  $\gamma = \min$ .

Рис. 5 показує, як змінюється величина втрат у двигуні  $\Delta P$ , нормованих за номінальними втратами  $\Delta P_n$ , в залежності від швидкості обертання  $\omega$  (або ковзання  $s$ ) при фазовому регулюванні швидкості механізму з усередненою механічною характеристикою навантаження

$$M/M_n = 0,4 + 0,6(\omega/\omega_n)^2, \quad (2)$$

характерною для турбомеханізмів із постійною складовою моменту. Криві 1 належать до схеми включення Штейнметца (1а – при ємності  $C=20$  мкФ, обраної з умови мінімуму коефіцієнта несиметрії при номінальному ковзанні  $s_n$ , 1б – при  $C=2$  мкФ, що забезпечує умову  $\gamma = \min$  при критичному ковзанні  $s_k$ ), крива 2 – до послідовно-паралельної схеми при  $C=20$  мкФ. Зі зменшенням швидкості нижче номінальної втрати у двигуні, включеному за схемою Штейнметца з робочою ємністю  $C=20$  мкФ, значно збільшуються, маючи свій максимум при  $\omega = 210$  1/с.

Для зменшення втрат при зменшенні швидкості необхідно змінювати значення ємності. Рис. 5 показує, що при  $C=32$  мкФ величина втрат при  $\omega = 210$  1/с істотно зменшується. Однак практично той самий ефект можна отримати у разі використання в нижній частині діапазону регулювання швидкості послідовно-паралельної схеми. З рис. 5 видно, що при  $\omega = 245$  1/с криві 1а і 2 перетинаються, тобто втрати в обох схемах з однаковою ємністю  $C=20$  мкФ рівні. При  $\omega > 245$  1/с менші втрати має схема Штейнметца, при  $\omega < 245$  1/с – послідовно-паралельна.

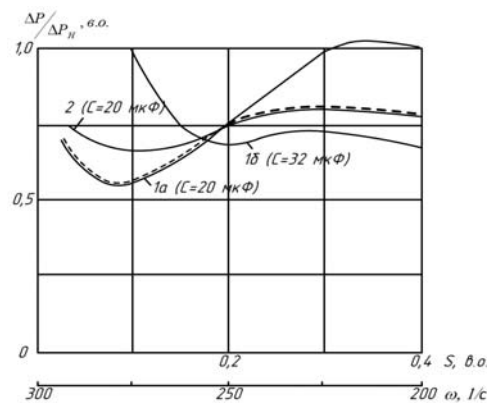


Рис. 5

Таким чином, виявляється доцільним застосовувати комбіновану схему, де здійснюється перемикавання схем з'єднання обмоток статора і тиристорів при  $\omega_{пер} = 245$  1/с. У верхній частині діапазону регулювання швидкості ( $\omega > \omega_{пер}$ ) використовується включення обмоток за схемою Штейнметца, а у нижній ( $\omega < \omega_{пер}$ ) – послідовно-паралельне включення. Застосування цієї схеми дає змогу використовувати постійну ємність у широкому діапазоні регулювання швидкості. Залежність втрат від швидкості та ковзання комбінованої схеми показана на рис. 5 штриховою лінією.

**Висновки.** Для запропонованої комбінованої схеми встановлено, що площа механічної характеристики  $\omega = f(M)$  може бути поділена на дві області лінією рівних втрат, ліворуч від якої менші втрати має схема Штейнметца, праворуч – послідовно-паралельна схема. Якщо механічна характеристика навантаження не перетинає лінію рівних втрат, то слід застосовувати одну з цих схем у всьому діапазоні частоти обертання в залежності від вигляду механічної характеристики. При перетинанні механічної характеристики лінією рівних втрат доцільно застосовувати комбіновану схему з перемиканням контактора у точці їхнього перетину. Розрахунки, проведені для моменту навантаження, що має постійну складову 40% від номінального моменту, підтвердили енергоефективність комбінованої схеми порівняно із схемами з постійною структурою силової частини.

1. Шуруб Ю.В. Сравнительный анализ схемных решений силовой части трехфазно-однофазных асинхронных электроприводов при параметрическом регулировании координат и изменении напряжения. *Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: Наукові праці КДПУ*. 2002. Вип. 1(12). С. 71-74.

2. Хижняк Т.А., Гусев О.О., Ліпінський І.С. Дистанційне керування електротехнічними пристроями в системах регулювання мікроклімату. *Технічна електродинаміка*. 2016. № 5. С. 32-34.

DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2016.05.032>

3. Lysenko V., Dudnyk A. Automation of Biotechnological Objects. Proc. 13th International Conference on *Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science TCSET2016*. Lviv, Ukraine, February 23-26, 2016. Pp. 44-46. DOI: <https://doi.org/10.1109/TCSET.2016.7451963>

4. Бібик О.В., Попович О.М., Шевчук С.П. Енергоефективні режими електромеханічної системи насосної установки багатопверхового будинку. *Технічна електродинаміка*. 2016. № 5. С. 38-45.

DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2016.05.038>

5. Malyar V., Hamola O., Maday V. Calculation of capacitors for starting up a three-phase asynchronous motor fed by single-phase power supply. Proc. 17th International Conference on *Computational Problems of Electrical Engineering CPEE2016*. Sandomierz, Poland, September 14-17, 2016. Pp. 1-4. DOI: <https://doi.org/10.1109/CPEE.2016.7738735>

6. Eltamaly A.M., Alolah A.I., Hamouda R., Abdulghany M.Y. A novel digital implementation of AC voltage controller for speed control of induction motor. *International Journal of Power and Energy Conversion*. 2010. Vol. 2. No 1. Pp. 78-94.

7. Шуруб Ю.В. Статистична оптимізація регульованих за напругою асинхронних електроприводів. *Технічна електродинаміка*. 2014. № 5. С. 116–118.

8. Попович О.М., Головань І.В. Уточнення аналізу режимів роботи асинхронних двигунів у складі електромеханотронних систем еквівалентуванням їх польових моделей коловими. *Технічна електродинаміка*. 2014. № 5. С. 113–115.

9. Mazurenko L.I., Dzhura O.V., Shevchuk S.P. Transients in a Transistor-Switched Capacitor Regulator of a Stand-Alone Induction Generator Supplying a Single-Phase Load. Proc. International Conference on *Modern Electrical and Energy Systems MEES2017*. Kremenchuk, Ukraine, November 15-17, 2017. Pp. 244-247. DOI: <https://doi.org/10.1109/MEES.2017.8248901>

УДК 621.313

## ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ КОМБИНИРОВАННОЙ СХЕМЫ ОДНОФАЗНОГО ВКЛЮЧЕНИЯ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА НАСОСНЫХ УСТАНОВОК

Ю.В. Шуруб<sup>1</sup>, канд.техн.наук, В.Е. Василенков<sup>2</sup>, канд.техн.наук, Ю.Л. Цищурский<sup>2</sup>

<sup>1</sup> – Институт электродинамики НАН Украины,

пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина,

e-mail: [shurub@bigmir.net](mailto:shurub@bigmir.net)

<sup>2</sup> – Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины,

ул. Героев Оборона, 15, Киев, 03041, Украина.

Для насосных установок предложена комбинированная схема однофазного включения регулируемого по напряжению асинхронного электропривода с трехфазным двигателем, которая позволяет получить удовлетворительные эксплуатационные и энергетические характеристики в пусковом и рабочем режимах при постоянной емкости фазосдвигающего конденсатора. Доказана возможность уменьшения потерь мощности за счет применения переключения схем включения обмоток двигателя на разных диапазонах регулирования скорости по сравнению со схемами с постоянной структурой. Библ. 9, рис. 5.

**Ключевые слова:** асинхронный электропривод, фазосдвигающий конденсатор, однофазное питание.

## INVESTIGATION OF PROPERTIES OF COMBINED SCHEME OF SINGLE-PHASE SWITCHING OF INDUCTION ELECTRIC DRIVE OF PUMPING PLANTS

Yu.V. Shurub<sup>1</sup>, V.Y. Vasilenkov<sup>2</sup>, Yu.L. Tsitsyurskiy<sup>2</sup>

<sup>1</sup> – Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,

pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine.

E-mail: [shurub@bigmir.net](mailto:shurub@bigmir.net)

<sup>2</sup> – National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine,

Heroyiv Oborony st., 15, Kyiv, 03041, Ukraine.

A combined circuit for single-phase switching of a voltage-controlled induction electric drive with a three-phase motor is proposed for pump plants, which allows to obtain satisfactory operational and power characteristics in starting and operating modes at a constant capacitance of a phase-shift capacitor. It is proved that it is possible to reduce power losses due to the use of different switching the circuits of the motor windings at different speed control ranges as compared to schemes with a constant structure. References 9, figures 5.

**Key words:** induction electric drive, phase-shift capacitor, single-phase power supply.

1. Shurub Yu.V. Comparative analysis of circuit solutions of the power part of three-phase single-phase induction electric drives with parametric adjustment of coordinates and varying voltage. *Visnyk Kremenchutskoho derzhavnoho politekhnichnoho universytetu: Naukovi pratsi KDPU*. 2002. No 1(12). Pp. 71-74. (Rus)

2. Khizhniak T.A., Husev O.O., Lipynskiy I.S. Remote control of electromechanical devices in the climate control system. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2016. No 5. Pp. 32-34. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2016.05.032> (Ukr)

3. Lysenko V., Dudnyk A. Automation of Biotechnological Objects. Proc. 13th International Conference on *Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science TCSET2016*. Lviv, Ukraine, February 23-26, 2016. Pp. 44-46. DOI: <https://doi.org/10.1109/TCSET.2016.7451963>

4. Bibik O.V., Popovych O.M., Shevchuk S.P. Power effective modes electromechanical system of pump installation of the multistorey building. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2016. No 5. Pp. 38-45. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2016.05.038> (Ukr)

5. Malyar V., Hamola O., Maday V. Calculation of capacitors for starting up a three-phase asynchronous motor fed by single-phase power supply. Proc. 17th International Conference on *Computational Problems of Electrical Engineering CPEE2016*. Sandomierz, Poland, September 14-17, 2016. Pp. 1-4. DOI: <https://doi.org/10.1109/CPEE.2016.7738735>

6. Eltamaly A.M., Alolah A.I., Hamouda R., Abdulghany M.Y. A novel digital implementation of AC voltage controller for speed control of induction motor. *International Journal of Power and Energy Conversion*. 2010. Vol. 2. No 1. Pp. 78-94.

7. Shurub Yu.V. Statistical optimisation of voltage regulated induction electric drives. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2014. No 5. Pp. 116-118. (Ukr)

8. Popovych O.M., Golovan I.V. Refinement of analysis operation of induction motors as part electromechanical systems using equivalent field models using electrical circuits. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2014. No 5. Pp. 113-115. (Ukr)

9. Mazurenko L.I., Dzhura O.V., Shevchuk S.P. Transients in a Transistor-Switched Capacitor Regulator of a Stand-Alone Induction Generator Supplying a Single-Phase Load. Proc. International Conference on *Modern Electrical and Energy Systems MEES2017*. Kremenchuk, Ukraine, November 15-17, 2017. Pp. 244-247. DOI: <https://doi.org/10.1109/MEES.2017.8248901>

Надійшла 05.03.2018

Остаточний варіант 17.05.2018